

УДК 622.24.051.55

А.М. Сліпчук, канд. техн. наук, Львів,  
Р.С. Яким, д-р техн. наук, Дрогобич, Україна

## ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЦЕСУ ЗАПРЕСОВУВАННЯ ЗУБКІВ У ШАРОШКИ БУРОВИХ ДОЛІТ

Аналізом характеру пошкоджень поверхонь отворів виявлені сліди від дії сил стиску що виникають вздовж осі зубка при втисненні його в породу вибою. Також виявлено сліди деформації від дії згину на зубок залежно від орієнтації його ковзання по вибою. Фіксували й притирання, фреттинг-корозію, пошкодження локальних ділянок стінок отворів спричинені прокручуванням зубка навколо своєї осі в отворі вінця шарошки. У випадку застосування зубків із симетричним загостренням породоруйнівної частини ефективним виявляється орієнтація твірної вражаючої головки зубка під деяким кутом до осі вінця шарошки. Розрахунки показують, що оптимальним є такий кут рівний  $45^\circ$ .

**Ключові слова:** запресовування зубків, бурові долота

Анализом характера поврежденных поверхностей отверстий обнаружены следы от действия сил сжатия возникающих вдоль оси зубка при нажатии его в породу забоя. Также обнаружены следы деформации от действия сгиба на зубок зависимости от ориентации его скольжения по забою. Фиксировали и притирание, фреттинг-коррозию, повреждения локальных участков стенок отверстий вызванные прокруткой зубка вокруг своей оси в отверстии венца шарошки. В случае применения зубков с симметричным обострением породоразрушающей части эффективным оказывается ориентация образующей впечатляющей головки зубка под некоторым углом к оси венца шарошки. Расчеты показывают, что оптимальным является такой угол равен  $45^\circ$ .

**Ключевые слова:** запрессовка зубков, буровые долота

The analysis of the nature of the damage to the surfaces of the openings revealed traces of the action of the compressive forces arising along the axis of the tungsten carbide inset cutter when squeezing it into the rock face. Also found traces of deformation from the action of bending to the tungsten carbide inset cutter, depending on the orientation of its slip on the face. Fixing and rubbing, fretting-corrosion, damage to the local areas of the walls of the holes caused by scrolling the tungsten carbide inset cutter around its axis in the opening of the rolling-cutter teeth row. In the case of the use of tungsten carbide inset cutter with symmetrical exacerbation of the breeding part, the orientation of the creature's impressive head of the tungsten carbide inset cutter is determined by an effective angle to the axis of the crown of the tungsten carbide inset cutter pick. Calculations show that an angle of  $45^\circ$  is optimal.

**Keywords:** crimping of teeth, drill bits

**Постановка проблеми.** Тришарошкові бурові долота з твердосплавним вставним породоруйнівним оснащенням знайшли широке застосування при спорудженні свердловин різного призначення [1]. Виготовлення таких доліт ставить перед долотобудуванням комплекс вимог щодо вибору сталей для шарошок доліт, параметрів насичення вуглецем й термообробки, технологічних операцій формоутворення отворів та складання з'єднання

„зубок-шарошка”. Вставне породоруйнівне оснащення експлуатується в складних умовах і часто виходить з ладу через недосконалість конструкції й технології виготовлення доліт. Тому дослідження шляхів підвищення якості вставного породоруйнівного оснащення на етапах створення доліт є актуальним і актуальним завданням долото будування [2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У міру повороту шарошки навколо осі зубка, що заглибився вражаючою частиною в породу, відбуваються деформації та руйнування породи вибою. При входженні в породу вражаючої частини наступного зубка відбувається вивертання сколеної породи попереднім зубком [3].

Аналізом характеру відпрацювання та втрати працездатності вставного породоруйнівного оснащення встановлено факти розхитування, прокручування зубків навколо власної осі й зміна орієнтації їхньої вражаючої частини, виламування та випадання твердосплавних зубків.

Миттєве навантаження на зубки шарошки може сягати 80 – 85 % усього навантаження на долото [4].

Процес шарошкового буріння – руйнування подрібнювально-сколювальною дією на породу вибою.

Відбувається ковзання оснащення шарошок по поверхні вибою в радіальному й тангенціальному напрямку.

„Security DBS Dresser Industries Inc.” розроблено долото у якого зрівноважено діючі зусилля й збалансованим розсіюванням навантаження [5]. В конструкції реалізовано ефект оптимальної орієнтації породоруйнівного оснащення й забезпечення умов що попереджують утворення гребенів на вибої.

Руйнування породи вибою твердосплавними зубками спричинює складний напружений стан тіла зубка та тіл вінців шарошки. Породоруйнівне оснащення шарошок на основі твердосплавних зубків із загостреною вражаючою частиною зазнає дії згинальних та крутних навантажень.



Рисунок 1 – Загальний вигляд вставного породоруйнівного оснащення відпрацьованого тришарошкового бурового долота

Крутний момент відносно осі зубка виникає через характер руху шарошок, що спричинює постійну зміну орієнтації передньої площини вражаючої частини вставного зубка. Це дає найкращий ефект в руйнуванні породи вибою.

При обертанні шарошки породоруйнівні зуби, що проникли вражаючою частиною у породу вибою, зазнають поздовжні та поперечні навантаження. Навантажений зубок здійснює відносно своєї твірної поздовжній й поперечний ковзання. Сили реакції вибою спричинюють складний напружений стан вражаючої та вихідної з тіла вінця частини зубка. Різні точки контакту зубків з породою здійснюють нерівномірне ковзання. Сили тертя-сколювання сприяють виникненню моменту скручування зубка.

Проникнення вражаючої частини твердосплавного зубка в породу, а також обертальний рух шарошки по вибою спричинює виникнення (рис. 2): дотичних та згинаючих й стискаючих напружень. Це різко знижує міцність з'єднання „зубок-шарошка”.

У місці контакту спряжених поверхонь виникають мікроковзання, мікрореформації та мікроруйнування.

**Формулювання цілі статті.** Аналізом характеру пошкоджень поверхонь отворів виявлені сліди від дії сил стиску що виникають вздовж осі зубка при втисненні його в породу вибою. Також виявлено сліди деформації від дії згину на зубок залежно від орієнтації його ковзання по вибою. Фіксували й притирання, фреттинг-корозію, пошкодження локальних ділянок стінок отворів спричинені прокручуванням зубка навколо своєї осі в отворі вінця шарошки.

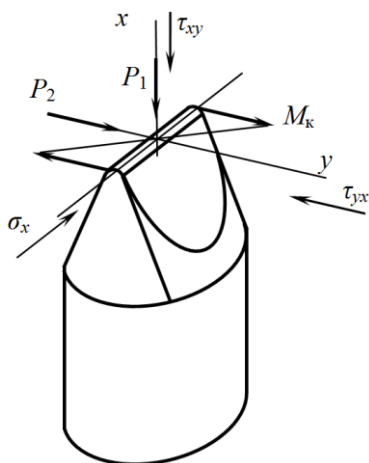


Рисунок 2 – Характер дії напружень на вершині твердосплавного зубка

Аналізом характеру пошкоджень породоруйнівного оснащення шарошок виявлено що зі збільшенням величини осьового навантаження на долото збільшуються випадки розколювання, руйнування твердосплавних зубків.

**Виклад основного матеріалу.** Для аналізу характеру напружень що виникають в твердосплавному зубку скористаємося теорією пружності [9] й досягненнями в області механіки матеріалів [6]. За умов орієнтації вражаючої частини твердосплавного зубка вздовж твірної, між діючими напруженнями мають існувати такі напруження:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

У випадку дії по довільній площадці деякого дотичного напруження, то по перпендикулярній до неї площадці обов'язково діятиме дотичне напруження, рівне за величиною і протилежне за знаком [6]. Відповідно до гіпотези плоских перерізів механіки матеріалів матимемо такі розрахункові формули:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{P_1}{2xd_3} + \frac{P_2y(x-r_0)}{2x^3d_3} \\ \sigma_y = 0 \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{3P_2(x^2-y^2)}{4x^3d_3} \end{cases} \quad (2)$$

де  $d_3$  – діаметр вставного твердосплавного породоруйнівного зубка,

$r_0$  – радіус заокруглення вражаючої частини вставного твердосплавного зубка,

$P_1$  – поздовжня сила що діє на уражаючу частину зубка,

$P_2$  – поперечна сила що діє на уражаючу частину зубка.

Взявши за основу  $\sigma_x$  розв'яжемо системи рівнянь (1) і (2).

Оскільки

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \quad (3)$$

маємо:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -\frac{P_1}{2x^2 d_3} + \frac{3P_2 y \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{2x^3 d_3}. \quad (4)$$

Інтегруючи,

$$\tau_{xy} = -\int \frac{P_1}{2x^2 d_3} dy + \int \frac{3P_2 \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{2x^3 d_3} y dy. \quad (5)$$

отримаємо

$$\tau_{xy} = -\frac{P_1}{2x^2 d_3} y + \frac{3P_2 \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{4x^3 d_3} y^2 + C. \quad (6)$$

де  $C = C_1 + C_2$  – деяка функція інтегрування.

Припустимо, що по гранях відбувається ідеальне ковзання, тобто  $x = y$

і  $\tau_{xy} = \sigma_x$ , тоді

$$-\frac{P_1}{2x d_3} + \frac{P_2 x(x - r_0)}{2x^3 d_3} = -\frac{P_1}{2x^2 d_3} x + \frac{3P_2 \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{4x^3 d_3} x^2 + C \quad (7)$$

Отже,

$$C = \frac{3P_2 r_0}{4x^2 d_3}. \quad (8)$$

Розрахункова формула для дотичних напружень матиме вигляд

$$\tau_{xy} = -\frac{P_1}{2x^2 d_3} y + \frac{3P_2 r_0}{4x^2 d_3} + \frac{3P_2 \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{4x^3 d_3} y. \quad (9)$$

Оскільки

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = -\frac{P_1}{x^3 d_3} y + \frac{3P_2 r_0}{2x^3 d_3} + \frac{9P_2 \left(1 - \frac{2}{x} r_0\right)}{2x^4 d_3} y^2. \quad (11)$$

$$\sigma_y = -\int \frac{P_1}{x^3 d_3} y dy + \frac{3}{2} \int \frac{P_2 r_0}{x^3 d_3} dy + \frac{9}{2} \int \frac{P_2 \left(1 - \frac{2}{x} r_0\right)}{x^4 d_3} y^2 dy. \quad (12)$$

$$\sigma_y = -\frac{P_1}{2x^3 d_3} y^2 + \frac{3P_2 r_0}{2x^3 d_3} y + \frac{3P_2 \left(1 - \frac{2}{x} r_0\right)}{2x^4 d_3} y + C_3. \quad (13)$$

Приймаючи аналогічні вище прийнятим допущення, і прирівнюючи ліві частини рівнянь (9) і (13), отримаємо  $C_3 = 0$ .

Тепер розрахункова формула для  $\sigma_y$  матиме вигляд

$$\sigma_y = -\frac{y}{2x^3 d_3} \left( -P_1 y + 3P_2 \left( r_0 + \frac{y^2}{x} \left( 1 - \frac{2}{x} r_0 \right) \right) \right). \quad (14)$$

Результуюче розрахункове напруження розраховується згідно енергетичної теорії міцності:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}. \quad (15)$$

При проникненні породоруйнівної частини зубка в породу вибою концентрація напружень головно локалізується у вершині поверхні зубка. Це зумовлює розробку широкої гами конструкцій вражаючої частини породоруйнівних зубків. Зокрема, „Hughes Christensen Co.” розроблено зубки з односторонньою вибіркою [7]

У випадку застосування зубків із симетричним загостренням породоруйнівної частини ефективним виявляється орієнтація твірної вражаючої головки зубка під деяким кутом до осі вінця шарошки. Розрахунки показують, що оптимальним є такий кут рівний  $45^\circ$ . Відпрацювання бурових доліт з такою конструкцією породоруйнівного оснащення виявило підвищення ефективності руйнування породи вибою, що позитивно вплинуло на показники проходки долота.

Для забезпечення надійності з'єднання „хвостовик зубка – отвір шарошки” від прокручування встановимо умову для встановлення граничної величина натягу у з'єднанні.

При посадці зубка виникає контактний тиск  $p$  й відповідна йому сила тертя, яка припадає на елементарну площадку  $ds = rhd\phi$  рівна

$$dp = p_0 r h d\phi.$$

де  $r$  – радіус хвостовика вставного зубка,

$h$  – висота хвостовика вставного зубка, що спряжений з поверхнею отвору в шарошці,

$f$  – коефіцієнт тертя в спряженні контактуючих поверхонь з'єднання.

Момент цієї сили відносно осі симетрії зубка  $dM_T = p_0 r^2 h f d\varphi$ .

Інтегруючи цей вираз отримаємо вираз для визначення моменту сил тертя

$$dM_T = p_0 r^2 h f \int_0^{2\pi} d\varphi = p_0 r^2 h f 2\pi.$$

Для уникнення прокручування необхідно щоб задовольнялася умова  $M_T > M_K$ . Тепер маємо

$$M_K < 2\pi p_0 h f r^2.$$

Необхідний тиск між спряженими поверхнями хвостовика зубка й отвору в шарошці

$$p_0 = \frac{M_K}{2\pi h f r^2}.$$

З іншої сторони, скориставшись формулами Ляме [6]

$$p_0 = \frac{\Delta E}{(A+B)d_s},$$

де  $\Delta$  – натяг у з'єднанні,

$E$  – модуль пружності

$d_s$  – діаметр хвостовика зубка

$$A+B = \frac{0,5b^2}{0,25b^2 - r^2},$$

$b$  – товщина вінця шарошки в якій виконані отвори під посадку зубків.

Отже, величина натягу у з'єднанні повинна задовольняти умову

$$\Delta \geq \frac{0,5M_K b^2}{\pi E h f (0,25b^2 - r_s^2) r_s}.$$

Виходячи з даних поданих в [8] розглянемо умови для забезпечення надійності з'єднання „хвостовик зубка – отвір шарошки” від згинаючого моменту на зубку.

При навантаженні з'єднання згинальним моментом  $M$  на рівномірну епюру тисків від посадки накладається епюра тисків, характерна для згину.

При цьому  $0,5M$  припадає уражаючу частину зубка, така ж величина моменту припадає на протилежну сторону основи хвостовика зубка.

Виходячи з класичних підходів матимемо тиск

$$p_1 = \frac{4}{\pi} \frac{M}{2W} = \frac{12M}{\pi dh^2} \leq p$$

де  $\frac{4}{\pi}$  – множник, що враховує характер епюри тисків по колу хвостовика вставного зубка

$$W = \frac{dh^2}{6} - \text{момент опору згину перерізу хвостовика.}$$

Значення допустимого моменту для забезпечення надійності з'єднання „хвостовик зубка – отвір шарошки” можна прийняти

$$M = 0,2pdh^2,$$

При цьому покладемо  $p_1 = 0,75p$ .

**Висновки.** Допустимий момент пропорційний квадрату висоти, тому з'єднання що піддаються значним згинаючим моментам не можна виконувати з малими значеннями діаметра й висоти хвостовика зубка.

У подальшому практичний інтерес є у необхідності моделювання варіантів розподілу напружень (контактних тисків) при різних показниках шорсткості спряжених деталей, а також варіантів розподілу напружень (контактних тисків) у вінці шарошки при різних відстанях один від одного твердосплавних зубів.

**Список використаних джерел:** 1. Неупокоев В. Г. Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот / Неупокоев В. Г. – Самара: Издательство Самарского научного центра Российской академии наук, 2000. – 376 с. 2. Морозов Л.В. Повышение долговечности буровых долот на основе компьютерного анализа элементов конструкций и их сборки: дис. ... кандидата техн. наук: спец. 05.02.08 / Морозов Леонид Владимирович. – Самара, 2003. – 180 с. 3. Яким Р.С. Науково-прикладні засади підвищення довговічності тришарошкових бурових доліт: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.12 / Яким Роман Степанович. – Івано-Франківськ, 2012. – 293 с. 4. Яким Р.С. Підвищення якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок тришарошкових бурових доліт / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина, І.С. Яким // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 3 (48). – С. 127-138. 5. Лорд Р. Новые достижения в технологии производства буровых долот / Лорд Р. // Нефтегазовые технологии. – 2006. – № 3. – С. 44-49. 6. Писаренко Г. С. Опір матеріалів. / Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Є. С. – [2-е вид., доп. і переробл.]. – К.: Вища школа, 2004. – 655 с. 7. Синев С. В. Разрушение горных пород вооружением шарошечного долота / Синев С. В. // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2010. – № 1. – С. 8-12. 8. Решетов Д. Н. Детали машин / Решетов Д. Н. – [4-е изд., перераб. и доп.] – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с. 9. Тимошенко С. П. Теория упругости / Тимошенко С.П., Гудьер Дж.; пер с англ. под ред. Шапиро Г.С. – [2-е изд.]. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.



**Bibliography (transliterated):** 1. *Neupokoev V.G.* Voprosy teorii i praktiki proektirovanija, pro-izvodstva i jekspluatacii burovih sharoshechnyh dolot / Neupokoev V. G. – Samara: Izda-tel'stvo Samarskogo nauchnogo centra Rossij-skoj akademii nauk, 2000. – 376 s. 2. *Morozov L.V.* Povyshenie dolgovechnosti burovih dolot na osnove komp'ju-ternogo analiza jelementov konstrukcij i ih sborki: dis. ... kandidata tehn. nauk: spec. 05.02.08 / Morozov Leonid Vladimirovich. – Samara, 2003. – 180 s. 3. *Jakim R. S.* Naukovo-prikladni zasadi pidvishhennja dovgovichnosti trisharoshkovih burovih dolit: dis. ... doktora tehn. nauk: 05.05.12 / *Jakim Roman Stepanovich.* – Ivano-Frankivs'k, 2012. – 293 s. 4. *Jakim R.S.* Pidvishhennja jakisnih pokaznikov vstavnogo porodorujnivnogo osnashhennja sharoshok trisharoshkovih burovih dolit / *R. S. Jakim, Ju. D. Petrina, I. S. Jakim* // Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovishh. – 2013. – № 3 (48). – S. 127-138. 5. *Lord R.* Novye dostizhenija v tehnologii proizvodstva burovih dolot / *Lord R.* // Neftegazovye tehnologii. – 2006. – № 3. – S. 44-49. 6. *Pisarenko G. S.* Opir materialiv. / *Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umans'kij Ė. S.* – [2-e vid., dop. i pererobl.]. – K.: Vishha shkola, 2004. – 655 s. 7. *Sinev S. V.* Razrushenie gornyh porod vooruzheniem sharoshechnogo dolota / *Sinev S. V.* // Nauka v neftjanoj i gazovoj promyshlennosti. – 2010. – № 1. – S. 8-12. 8. *Reshetov D. N.* Detali mashin / *Reshetov D. N.* – [4-e izd., pererab. i dop.] – M.: Mashinostroenie, 1989. – 496 s. 9. *Timoshenko S. P.* Teorija uprugosti / *Timoshenko S. P., Gud'er Dzh.*; per s angl. pod. red. Shapira G. S. – [2-e izd.]. – M.: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. – 560 s.